

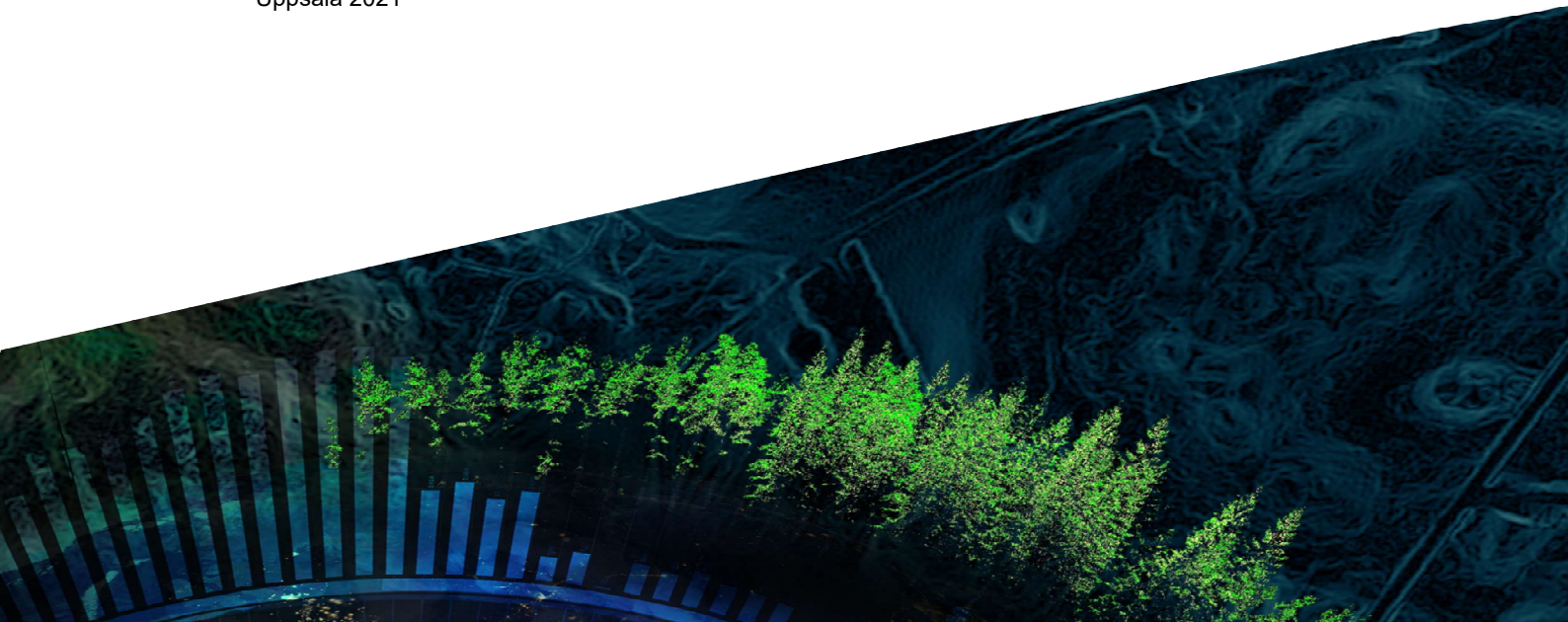


Satellitövervakning av cyanobakterieblomningar i sjöar

– en jämförande studie för Mälaren

Patrik Hildén

Självständigt arbete i biologi 15 hp
Sveriges lantbruksuniversitet, SLU
Institutionen för vatten och miljö
Uppsala 2021



Satellitövervakning av cyanobakterieblomningar i sjöar – en jämförande studie för Mälaren

Patrik Hildén

Handledare: Stina Drakare, SLU, institutionen för vatten och miljö
Petra Philipson, Brockmann Geomatics Sweden AB

Examinator: Ulf Grandin, SLU, institutionen för vatten och miljö

Omfattning: 15 hp

Nivå och fördjupning: G2E

Kurstitel: Självständigt arbete i biologi

Kurskod: EX0894

Kursansvarig inst.: Institutionen för vatten och miljö

Utgivningsort: Uppsala

Utgivningsår: 2021

Nyckelord: Cyanobakterier, algblooming, klorofyll, fjärranalys, Mälaren

Sveriges lantbruksuniversitet

Fakulteten för naturresurser och jordbruksvetenskap

Institutionen för vatten och miljö

Arkivering och publicering

Godkända självständiga arbeten (examensarbeten) vid SLU publiceras elektroniskt. Som student äger du upphovsrätten till ditt arbete och behöver godkänna publiceringen. Metadata och fulltext blir då synliga och sökbara på internet. I samband med att dokumentet laddas upp arkiveras det även digitalt.

☒ JA, jag ger härmed min tillåtelse till att föreliggande arbete publiceras enligt SLU:s avtal om överlåtelse av rätt att publicera verk.

<https://www.slu.se/site/bibliotek/publicera-och-analysera/registrera-och-publicera/avtal-for-publicering/>

☐ NEJ, jag ger inte min tillåtelse att publicera fulltexten av föreliggande arbete. Arbetet laddas dock upp för arkivering och metadata och abstract blir synliga och sökbara.

Sammanfattning

Cyanobakterieblomningar ökar världen över och orsakar både ekonomiska förluster och hälsorelaterade problem. På grund av cyanobakteriers potentiellt skadliga inverkan sker regelbunden provtagning i svenska vatten. Men traditionell provtagning är både kostsam och tidskrävande, samtidigt som metoden är orealistisk att använda över stora ytor. Satellitövervakning är en alternativ metod som kan användas för att identifiera pågående cyanobakterieblomningar.

Syftet med denna studie är att undersöka på vilka sätt satellitövervakning kan komplettera den traditionella provtagningen i sjöar. Som utvärdering genomförs jämförelser mellan resultat från provtagning och satellit, även satellitbilder granskas för att ge en indikation om förhållanden vid provtagningsdagen.

Mälaren har valts som studieobjekt på grund av sjöns morfologiska och ekologiska diversitet, vilket möjliggör utvärdering av satellittekniken under olika förhållanden. Mälaren har under en längre tid även ingått i etablerade provtagningsprogram och det finns gott om analyser från provtagningar att tillgå.

Resultaten visar att det under perioden som studerats finns få tillfällen där både resultat från provtagning och satellit finns att jämföra. Moln är den främsta anledningen till att satellitdata inte kan registreras och låg provtagningsfrekvens begränsar tillgängligheten av analyser från vattenprov. Men eftersom insamling och analys av data sker på olika sätt för de två metoderna är det inte heller alltid nödvändigt eller lämpligt med direkta jämförelser.

Trots få datum där jämförelser är möjliga visar granskningen av satellitbilder intressanta och lovande resultat för satellitövervakning som komplement till den traditionella provtagningen. I vissa situationer, som vid förekomsten av cyanobakterier i ytansamlingar och stråk, kan satellitövervakning till och med vara en bättre metod.

Nyckelord: cyanobakterier, algbloomning, klorofyll, fjärranalys, Mälaren

Abstract

Cyanobacterial blooms are increasing worldwide, causing both economical losses and health related issues. Because of the possible negative consequences of cyanobacterial blooms, regular sampling is conducted in Swedish waters. But traditional sampling is costly and time demanding, and also an unrealistic method for covering large areas. Satellite monitoring is an alternative method that can be used for identification of ongoing cyanobacterial blooms.

The purpose of this study is to investigate how satellite monitoring can complement traditional sampling in lakes. As evaluation results from traditional sampling are compared to results from satellite monitoring, satellite images have also been used in order to see how conditions were on the day of sampling.

Because of its morphological and ecological diversity Lake Mälaren was chosen as study object, allowing testing the technical equipment used for satellite monitoring under different conditions. Further beneficial is that sampling results from multi-year monitoring programs are available for Lake Mälaren.

The results of this study show that there are few dates with data available for comparisons of traditional sampling and satellite monitoring. The presence of clouds is the foremost reason hindering satellite monitoring, while low sampling frequency limits the availability of data from field sampling. But since data collection and analysis are conducted differently for the two methods it is not always necessary or suitable with direct comparisons.

Despite few dates with comparable data between methods, evaluation of satellite images show interesting and promising results for satellite monitoring as a complement to traditional sampling. In some situations, as for cyanobacterial surface blooms, satellite monitoring could even be the better method.

Keywords: cyanobacteria, algal bloom, chlorophyll, remote sensing, Lake Mälaren

Innehållsförteckning

1. Introduktion	1
1.1 Syfte och frågeställningar	2
1.2 Växtplankton	2
1.2.1 Cyanobakterier	5
1.2.2 Cyanobakterieblomningar	7
1.3 Provtagning i sjöar	8
1.3.1 Mälaren	8
1.4 Satellitövervakning av sjöar	11
1.4.1 Optiska variationer i sjöar	11
1.4.2 Allmänt om satellitteknik	13
1.4.3 Applicerad teknik för Mälaren	14
2 Metod	17
2.1 Data från provtagning i Mälaren	17
2.2 Data från satellitövervakning	17
2.3 Dataurval	17
2.4 Dataanalys och kvalitetsgranskning	18
3 Resultat	19
3.1 Datatillgång	19
3.2 Samband mellan parametrar	21
3.3 Identifiering av cyanobakterier med satellit	26
4 Diskussion	29
5 Slutsats	33
Referenser	34
Bilaga 1	38

1. Introduktion

Flera svenska sjöar utgör dricksvattentäkter som försörjer stora delar av befolkningen med rent vatten. Omkring två miljoner människor är beroende av Mälaren för sin dricksvattenförsörjning (Sonesten, 2013). Algblomningar kan göra dricksvatten otjänligt och förtäring av cyanobakterier kan leda till sjukdom, eller mer sällsynt dödsfall. Vid pågående algblomningar avråds ofta både människor och husdjur även från bad för att minimera exponering.

Utöver hälsorisker orsakar algblomningar stora ekonomiska förluster. Granéli & Turner (2006) redovisar förluster för EU uppskattade till 813 miljoner dollar, vilket är nästan tio gånger mer än i USA där förlusterna uppgick till 82 miljoner dollar. Bland de mest påverkade branscherna återfinns fiskerinäringen och turistindustrin.

På grund av de potentiellt stora konsekvenserna av algblomningar sker provtagning av cyanobakterier och andra växtplankton inom miljöövervakningsprogram, samt vid råvattenintag och badplatser. Flera direktiv och riktlinjer finns för de svenska vattenförekomsterna men juridiskt bindande gränsvärden för toxiner saknas, även för dricksvatten. Det har medfört att Livsmedelsverkets rekommendation är att alla algblomningar bör betraktas som giftiga (Livsmedelsverket, 2018).

Sett till landyta är Sverige ett av de länder i världen som har flest antal sjöar och av dessa är fler än 100 000 större än 1 hektar (Bernes, 2011). Traditionell provtagning är både kostsam och tidskrävande (Richardson, 1996) och algblomningar kan dessutom bildas och försvinna på kort tid. Att övervaka ett större antal sjöar med traditionell provtagning i högre frekvens är inte realistiskt. Med dagens provtagningsprogram där växtplankton på många platser inte undersöks mer än en gång per säsong kan algblomningar därför lätt missas.

Satellitövervakning registrerar data för stora områden på väldigt kort tid och kan, om tillförlitligheten är hög, utgöra ett bra verktyg för övervakning av cyanobakterieblomningar. Sveriges meteorologiska och hydrologiska institut (SMHI) tillhandahåller exempelvis redan idag en tjänst som informerar om

cyanobakterieblomningar i Östersjön (SMHI, 2020), liknande tjänster kan utvecklas och anpassas till sjöar.

1.1 Syfte och frågeställningar

Syftet med denna studie är att öka förståelsen för när cyanobakterieblomningar kan identifieras via satellit. Mälaren valdes som studieobjekt eftersom sjön har både en morfologisk och ekologisk diversitet, men också skillnader i tillförsel av näring och partiklar mellan bassänger. Följande frågeställningar avses att besvaras i studien: Hur kan satellitövervakning komplettera den traditionella provtagningen av cyanobakterier i sjöar? På vilka sätt överensstämmer satellitövervakning med traditionell provtagning för klorofyll och cyanobakterier? Vad begränsar jämförelsen av satellitdata med data från traditionell provtagning?

1.2 Växtplankton

Växtplankton är mikroskopiskt små vattenlevande organismer vars storlek varierar mellan 1–100µm och där generationstiden inte är längre än några dagar (Granéli & Turner, 2006). På grund av sin storlek är växtplankton beroende av havs- eller sötvattensströmmar för att förflytta sig i vattenmassorna. Växtplanktonfloran varierar med rådande levnadsvillkor där både abiotiska och biotiska faktorer spelar in. Dessa inkluderar solljus, temperatur, näringstillgång, vattenflöden, betning och konkurrens (Granéli & Turner, 2006).

På svenska breddgrader följer planktonfloran en årssuccession, vilket är värdefullt att känna till när växtplanktons och cyanobakteriers variationer över tid studeras. Årssuccessionen skiljer sig mellan sjöar och styrs av både fysiska parametrar och näringsinnehåll. Säsongen för högre biologisk produktivitet sträcker sig från vår till höst och inleds och avslutas normalt med en fullständig omblandning av vattenmassan. Under sommaren är djupa sjöar termiskt skiktade, vilket gör att omblandning endast sker i det varmare ytskiktet (Tikkanen & Willén, 1992).

Bernes (2005) beskriver skiftningarna i näringsinnehåll, där det under den mörka och kalla delen på året byggs upp ett lager av näringsämnen som snabbt förbrukas då ljus och liv återkommer under våren. Näringsinnehållet i ytvattnet förblir sedan lågt under sommaren, mycket beroende på att växtligheten tilltar på land och binder näringsämnena. Näringsmängden i ytvattnet ökar igen vid höstomblandningen, då näring som varit otillgänglig på grund av temperaturskiktning stiger från djupet.

Sommer *et al.* (2012) beskriver växtplanktons säsongsvariation som den biologiska respons som följer ett ökat näringsinnehåll och en ökad mängd ljus på våren, där växtplankton snabbt ökar sin biomassa och grumlar vattnet samtidigt som de förbrukar vinterns uppbyggnad av näring. Växtplankton blir i sin tur betade av djurplankton vilket medför att vattnet klarnar i början av sommaren. Interaktionen mellan trofnivåer fortsätter med att djurplankton äts av fiskar, samtidigt som deras egen föda också minskar. Betningstrycket under sommaren gynnar svåratliga växtplanktonarter som exempelvis cyanobakterier. Detta stadium bryts genom en höstomblandning av vattenmassan som på nytt frigör näring, vilket gynnar bland annat kiselalger. På vintern är ljustillgången låg för växtplankton, särskilt vid förhållanden med snötäckt is, och övervintring sker ofta med olika typer av vilstadier i väntan på våren.

De allra flesta växtplankton är fotosyntetiserande, vilket gör dem beroende av solljus för att kunna tillgodogöra sig näring. Förhållanden med tillräckligt mycket ljus finns bara i sjöarnas ytligare skikt, även i klara vatten (Tikkanen & Willén, 1992). För att växtplankton ska kunna absorbera, omvandla och skydda mot solljus används olika typer av pigment och hjälppigment. Viktiga pigment för fotosyntesen indelas i tre huvudgrupper: klorofyller, fykobiliner och karotenoider (Snoeijs-Leijonmalm, 2017), vilka återfinns hos både alger och cyanobakterier (Tabell 1).

Tabell 1. Pigment hos växtplankton, efter data från Widén & Widén (2008).

Pigment	Färg	Exempel på artgrupp
Klorofyller <ul style="list-style-type: none"> - Klorofyll-a - Klorofyll-b - Klorofyll-c 	Grön	Alla Grönalger Heterokonter & pansarflagellater
Fykobiliner <ul style="list-style-type: none"> - Fykocyaniner - Allofykocyaniner - Fykoerytriner 	Blå Blå Röd	Cyanobakterier & Rödalger
Karotenoider <ul style="list-style-type: none"> - Karotener - Xantofyller 	Orange (betakaroten) Gul & Brun	De flesta alger Brunalger

Mängden pigment varierar mellan arter men också över tid inom samma art beroende på näringstillgång och exponering för ljus. Skillnader i exponering för ljus har studerats i laboratorium där det bland annat visats att växtplankton utvecklat en mörkare grön färg när ljustillgången begränsats (Mishra *et al.*, 2017).

Klorofyll-a är det absolut vanligaste pigmentet och återfinns hos samtliga arter växtplankton. Fortsättningsvis i denna studie är det klorofyll-a som avses när klorofyll nämns utan angivelse för typ. Då klorofyll-a förekommer hos alla växtplankton så används pigmentet ibland som uppskattning för mängden biomassa. Även karotener är vanligt förekommande hos många arter, medan fykobiliner främst återfinns hos cyanobakterier och rödalger. Fykoerytrin utnyttjas exempelvis av rödalger för att möjliggöra fotosyntes på större djup, där konkurrensen är lägre men dit endast blått ljus når (Widén & Widén, 2008).

1.2.1 Cyanobakterier

Cyanobakterier förekommer världen över i både sjöar och hav, såväl som i ovanligare och mer extrema miljöer. En liter ytvatten kan innehålla så mycket som 10 miljoner cyanobakterier, vilket tillsammans med övriga mikroorganismer utgör den till antalet största källan av liv på jorden (Snoeijs-Leijonmalm *et al.*, 2017).

Cyanobakterier är prokaryota och skiljer sig därigenom från de eukaryota algerna. Några exempel på utmärkande egenskaper hos cyanobakterier listas i Tabell 2, vilket inkluderar både arter med flytförmåga och andra med förmåga att fixera kväve (Dokulil & Teubner, 2000).

Tabell 2. Egenskaper hos vanliga artgrupper cyanobakterier, skapad från Dokulil & Teubner (2000).

Artgrupp/Släkten	Vanlig ekologisk förekomst/egenskap (art)
<i>Microcystis</i>	Kolonibildande i geléhölje
<i>Cylindrospermopsis</i> *	Välblandade vatten och kvävefixerande (<i>C. raciborskii</i>)
<i>Planktothrix</i>	Stratifierat förekommande i metalimnion genom flytegenskaper (<i>P. rubescens</i>), välblandade vatten i epilimnion men inte kvävefixerande (<i>P. agardhii</i>)
<i>Aphanizomenon</i>	Kvävefixerande (<i>A. flosaquae</i>), kolonibildande och välblandade vatten (<i>A. flosaquae</i>)
<i>Limnothrix</i>	Välblandade vatten (<i>L. redekei</i>)

* Art av tropiskt ursprung som ännu inte påträffats i Mälaren

Gasvakuoler liksom geléhöljen är strategier för cyanobakterier att sänka sin densitet och därmed öka flytförmågan (Tikkanen & Willén, 1992). Bland arter i sötvatten med förmåga att utveckla gasvakuoler återfinns de vanligt förekommande *Microcystis*, *Aphanizomenon* och *Dolichospermum* (Mishra *et al.*, 2019). När solljuset inte är tillräckligt produceras fler gasvakuoler och cyanobakterierna stiger mot ytan. Både celldelning och sprängda vakuoler på grund av värme från solen kan reglera djupet i nedåtgående riktning, en del arter

kan vid behov förflytta sig hela vägen ned till botten, där det i sedimenten vanligen finns tillgång till näring i form av fosfor (Widén & Widén, 2008).

Skillnader i färg och form kan också ses mellan arter. Cyanobakterierna uppträder encelligt, i filament eller kolonial form (Wetzel, 2001) och även om den blågröna färgen är vanligast så förekommer andra färger. *Planktothrix prolifica* är en cyanobakterie som orsakar rödaktiga vinterblomningar under Mälarens istäcke (Willén, 2001). Blomningar är annars främst begränsade till sommarmånaderna då även *P. prolifica* når sin peak i biomassa, vanligtvis i närhet av metalimninen som är språngskiktet mellan varmare ytvatten och kallare bottenvatten, där arten undviker sommarens starkare solljus (Larson *et al.*, 2014).

Cyanobakteriernas uppbyggnad och egenskaper påverkar de optiska förutsättningarna för klorofyllmätning, vilket innebär att andra metoder än de som används för alger kan behöva tillämpas (Mishra *et al.*, 2017). Fykobiliner finns endast i cyanobakterier och rödalger (*Rhodophyta*) och rödalger är varken vanligt förekommande i sötvatten eller som plankton (Wetzel, 2001). Fykobiliner kan därför underlätta identifieringen av cyanobakterier i sjöar. Enligt Dörnhöfer *et al.* (2018) är pigmenten Fykocyanin och fykoerytrin starkt sammankopplade med förekomsten av cyanobakterier och kan användas för att urskilja cyanobakterier från andra arter.

Cyanobakterier kan bilda toxin som är skadliga för både djur och människor, dessa indelas i tre klasser; neurotoxiner, vilka påverkar nervsignaler; hepatotoxiner (mikrocystiner) orsakar skador på levern, samt dermatoxiner som verkar irriterande på huden (Willén, 2001). Hälsoeffekterna från exponering kan bli allt från milda till allvarliga och relaterar till mängden toxin. Dödsfall inträffar årligen för boskap och husdjur som druckit sjövattnen under pågående blomning (Willén, 2001).

Alla arter kan inte bilda cyanotoxiner och cyanotoxiner bildas inte alltid hos de arter som innehar förmågan. Av de arter som kan producera toxiner återfinns flera inom släktena *Anabaena*, *Planktothrix* och *Microcystis* (Willén, 2007; Randolph *et al.*, 2008). Toxiner i svenska inlandsvatten innefattar bl.a. mikrocystiner, saxitoxiner, anatoxin-a, homoanatoxin-a och cylindrospermopsiner. Inom varje

grupp av toxin finns flertalet variationer, det har exempelvis upptäckts cirka 120 olika mikrocystiner och 50 olika saxitoxiner (Livsmedelsverket, 2018).

Det saknas juridiskt fastställda gränsvärden för cyanotoxiner, samtidigt tillåts inte mängden toxiner överstiga nivåer som kan vara skadliga för människors hälsa. Enligt livsmedelsverket bör därför större förekomster av cyanobakterier alltid betraktas som att de innehåller toxiner (Livsmedelsverket, 2018). Enligt Sonesten (2013) bör volymen cyanobakterier understiga 2 mm³/l, vilket är en gräns angiven av WHO i syfte att minimera hälsorelaterade problem.

1.2.2 Cyanobakterieblomningar

Trots att cyanobakterier evolutionärt inte längre klassas som alger benämns vanligen massförekomster av cyanobakterier alltjämt som algbloomingar. Algbloomingar är tillfällen då biomassan och därmed klorofyllmängden ökar kraftigt. Flera andra växtplanktonarter utöver cyanobakterier kan orsaka blomningar och bland annat kiselalger förekommer i höga volymer i Mälaren. I tempererade vatten är det dock cyanobakterier som står för majoriteten av de blomningar som bedöms vara skadliga (Johansen *et al.*, 2018).

På grund av de komplicerade samband som råder i naturen så finns luckor i förståelsen till varför algbloomingar uppkommer (Klemas, 2012), men stabila förhållanden och ett relativt lågt näringsinnehåll tros vara två faktorer som exempelvis gynnar tillväxten av kvävefixerande cyanobakterier (Bernes, 2005). För artsammansättningen av växtplankton är sensommaren den period i Sverige då sjöarna normalt är som minst påverkade av yttre parametrar (Willén, 2007).

Även om blomningar kan förekomma på större djup är fenomenet vanligast i de mer näringsrika ytvattnen, där de kan pågå i allt från timmar till flera veckor (Livsmedelsverket, 2018). Hur giftig en algblooming blir följer inte något fastställt mönster, vilket innebär att toxiska blomningar är svåra att förutspå i tid och rum (Randolph *et al.*, 2008). Samtidigt har det observerats att blomningar innehållande toxiner ökar världen över, något som kopplas till övergödningsproblematik samt det mänskliga bidraget till den globala uppvärmningen (O'Neil *et al.*, 2012).

1.3 Provtagning i sjöar

Tikkanen & Willén (1992) påpekar att planktonprov i möjligaste mån alltid bör tas i de centrala delarna av en bassäng, detta för att strandnära växtlighet och organismer inte ska ge missvisande resultat beträffande artsammansättningen. Idag är det Sveriges lantbruksuniversitet (SLU) som ansvarar för en stor del av den nationella samt även viss regional miljöövervakning i sötvatten. Ansvaret inkluderar kvalitetssäkring av provtagningens utförande och analys men också datavärdskap.

För växtplankton/cyanobakterier tas blandprov i epilimnion, vilket är det temperaturavgränsade varmare ytskiktet som uppstår i många sjöar under sommaren. Klorofyll ingår som en parameter under vattenkemi som vanligtvis tas som ytprov. För mer detaljerad information angående provtagningens tillvägagångssätt hänvisas till beskrivningar för vattenkemi och växtplankton i sjöar som tillhandahålls av Havs- och vattenmyndigheten (HaV, 2020).

1.3.1 Mälaren

Sveriges tredje största sjö Mälaren har en hög biologisk diversitet fördelad över många olika bassänger och vikar i varierande storlek. Mälaren är artrik och bara i bassängen Galten har upptäckts 429 taxa växtplankton, vilket Sonesten (2013) kopplar till den varierade morfologin och vattenkemin. Sett till hela arealen så är Mälaren en relativt grund sjö, medeldjup 12,8 m och där en femtedel av sjön inte är mer än 3 m djup (Sonesten, 2013). På grund av tidigare omfattande övergödningsproblem så finns även ett etablerat provtagningsprogram för sjön. Mälarens provtagningsprogram för växtplankton startade 1964, men har sedan dess förändrats flera gånger. Idag ingår Mälaren i det nationella provtagningsprogrammet ”De stora sjöarna” som finansieras av Havs- och vattenmyndigheten.

I Mälaren tas växtplanktonprov vanligen i provtagningsintervall 0-8 meter, men intervallet är beroende av djupet på bassängen som provtas och andra intervall förekommer i några av bassängerna. För klorofyll är det vanligast med ytprov vid ½ meters djup. Hur provtagningar fördelas mellan Mälarens bassänger kan ses i Bilaga 1. Aktuell provtagningssäsong och provtagningsintervall ämnar

täcka in vårblomningar av kiselalger samt eventuella blomningar av cyanobakterier under sommarsäsongen (Sonesten, 2013).

Miljöåtgärder som införandet av kemisk fällning i reningsverk och avledning av avloppsvatten till Östersjön, vilka skedde i slutet av 1960-talet samt början av 1970-talet, har bidragit till att fosforhalten i Mälaren minskat. Åtgärderna har även resulterat i en stor minskning av mängden cyanobakterier. Vid starten av Mälarens provtagnings- och åtgärdsprogram uppmättes i Galten som mest 27 mm³/l cyanobakterier (Sonesten, 2013), vilket är en stor skillnad mot dagens nivåer som sällan når 10 mm³/l. Mälaren är ändå fortsatt meso- till eutrof (Willén, 2001) som innebär att näringstillgången är måttlig till god, vilket också medför att algbloomingar är vanliga.

Den sydöstra delen av Mälaren är generellt mer näringsfattig än de västra och nordöstra delarna (Sonesten, 2013). Hur näringsämnen fördelas beror främst på var Mälarens större inflöden är lokaliserade. Hälften av vattnet som tillförs flödar in i den västligaste bassängen Galten och ytterligare 15 % via de nordöstliga bassängerna Ekoln och Skarven (Markensten, 2006). Från dessa två huvudflöden rör sig vattnet mot sydöstra delen av Mälaren och utloppet i Östersjön. Vattnets väg åskådliggörs genom den höga mängd partiklar och lösta ämnen som kan ses i de västliga och norra delarna, och som minskar vartefter de sedimenterar när vattnet når de sydöstra delarna (Figur 1).



Figur 1. Satellitbild över Mälaren från mars 2020. Skogsområden kan ses i grönt och övriga landområden har en ljus beige nyans. Mälarens huvudinflöden i väst respektive nordöst indikeras av tillförseln av stora mängder partiklar och lösta ämnen, vilket ger vattnet en roströd/brun färg. Koncentrationen partiklar och lösta ämnen minskar i det övre vattenskiktet genom transport mot utloppet i Östersjön, detta sker genom utspädning och sedimentering, vilket kan ses via den gradvisa nyansskillnaden av vattenfärg från väst till öst. Den sydöstra delen av Mälaren är betydligt mindre påverkad av tillförseln av partiklar och lösta ämnen och vattenfärgen ses därför som blågrön i denna del av sjön. Bildkälla: [ESA Copernicus Sentinel Data](#), SYKE.

Mälarens indelning har varierat över tid, de tidigare sex vattenförekomsterna/bassängerna har ökat i antal till dagens trettio två (Sonesten, 2013). De olika bassängerna har skilda förutsättningar, skillnader i djup mellan tre av bassängerna redovisas i Tabell 3.

Tabell 3. Djupparametrar för tre bassänger i Mälaren, efter data från Willén (2001).

	Galten	Björkfjärden	Ekoln
Medeldjup (m)	3,4	19,7	15,4
Maxdjup (m)	19	60	50
Siktdjup	0,9	3,2	1,7

1.4 Satellitövervakning av sjöar

De första satellitburna instrumenten speciellt riktade mot akvatiska miljöer kom redan på 1970-talet och därefter har teknikutvecklingen gått stadigt framåt. Insamling och analys av vattenprover i fält är både kostsamt och tidskrävande, och provtagning sker därför relativt glest. Satellitbaserad övervakning erbjuder ett kompletterande alternativ med mycket högre spatial och temporal upplösning.

Satelliterna Sentinel 3A och 3B som använts i denna studie togs i bruk 16 februari 2016 respektive 25 april 2018 (ESA, 2020a). Sentinel-3 passerar Sverige och Mälaren dagligen omkring halv tolv på förmiddagen. Möjligheten till daglig registrering av data är en av de stora fördelarna med dessa satelliter. Sentinel-3 är en del i Copernicus, ett omfattande miljö- och atmosfärsövervakningsprogram där flera ytterligare satelliter ingår, med användningsområden som inkluderar väderövervakning, topografimätningar och kartläggning av bränder. ESA (*European Space Agency*) har via EU fritt tillgängliggjort data från dessa satelliter, utan kostnad för samtliga användare.

Sentinel-3 är utrustad med flertalet instrument varav OLCI (*Ocean and Land Colour Instrument*) använts för Mälaren i denna studie. OLCI är ett optiskt instrument som är en vidareutveckling av instrumentet MERIS, vilket ingick i övervakningen via satelliten Envisat. Skillnader till OLCI innefattar bland annat ytterligare spektrala band samt minskad risk för solblänk genom att kamerorna vinklats i västlig riktning (ESA, 2020c). OLCI används främst för biologisk datainsamling och instrumentet är anpassat till både hav och land. De fem kamerorna som OLCI utrustats med täcker tillsammans ett område som är 1270 km brett (ESA, 2020b) och den fulla upplösningen motsvarar 300 x 300 m per pixel (ESA, 2020d). Instrumentet registrerar våglängder av ljus mellan 400-1020 nm, vilket inkluderar både det synliga spektrumet och nära infrarött ljus (ESA, 2020c).

1.4.1 Optiska variationer i sjöar

Det vi människor ser i naturen beror på interaktionen mellan ljuskällor och de objekt vi studerar. I akvatiska miljöer penetrerar inkommande solljus vattenytan, påverkas av vattnets egenskaper och innehåll och reflekteras tillbaka, därigenom

förmedlas information om de material som ljuset kommit i kontakt med (Mishra *et al.*, 2017). Vatten reflekterar endast omkring 2 % av det inkommande ljuset, vilket kan jämföras med 5-40 % reflektion från landytor (Richardson, 1996). Hög absorption gör att vattnet upplevs mörkare och mörkare ytor kräver känsligare sensorer vid satellitövervakning.

I sjöar finns en mängd olika partiklar och löst material som påverkar ljusets spridning och absorption. Alla typer av material som uppvisar en eller flera färger är möjliga att studera via satellit. De vanligaste vattenkvalitetsparametrarna som mäts med satellit är:

- Klorofyll-a
- Turbiditet
- Löst organiskt material (CDOM, *Coloured Dissolved Organic Matter*)

Det lösta organiska materialet består till största delen av humusämnen (Wetzel, 2001) vilka tillsammans med dött organiskt material, detritus, påverkar vattenfärgen. Om sjöar innehåller större mängder av dessa ämnen brukar det resultera i att de färgas gula eller bruna (Mishra *et al.*, 2017). Turbiditet är ett mått på hur mycket ljus som avviker från sin bana när ljuset kommer i kontakt med vatten, turbiditeten påverkas därför av- samt relaterar till mängden suspenderade partiklar (Philipson *et al.*, 2016). Den gröna färgen från klorofyll kan ses på ångar och i skogar, men även vattenförekomster innehåller fotosyntetiserande växtlighet samt klorofyllrikt växtplankton.

Biologiska egenskaper som pigment, form och storlek styr hur växtplankton reflekterar och absorberar ljus. För suspenderat material beror spridningen främst på partikelstorlek och mängd medan absorption beror mer på materialets egenskaper (Mishra *et al.*, 2017).

1.4.2 Allmänt om satellitteknik

Vid satellitövervakning av vattenkvalitet utnyttjas skillnader i spektrala egenskaper hos olika material för identifiering och kvantifiering. Solljus är vitt ljus som utöver UV och IR strålning innehåller hela det synliga ljusspektrumet, där varje våglängd representerar en färg. Olika material absorberar respektive sprider olika våglängder och den reflekterade delen av det infallande vita ljuset varierar därför beroende på objekt, vilket gör att olika färger framträder. Som exempel absorberar klorofyll rött och blått ljus, vilket gör att pigmentet genom det ljus som reflekteras uppfattas som grönt (Richardson, 1996).

Miljötilstånd i inlandsvatten kan studeras med hjälp av optiska instrument monterade på satelliter. Tekniken kräver molnfria förhållanden och enskilda eller samtliga pixlar, sensorns minsta beståndsdel som bestämmer upplösningen, behöver ibland uteslutas från vidare analys på grund av moln. Även pixlar som innehåller land behöver filtreras bort för att inte ge missvisande resultat. Efter filtrering kan data från kvarvarande pixlar bearbetas, vilket görs i form av matematiska beräkningar genom att applicera en eller flera för ändamålet lämpliga algoritmer. Resultatet kan därefter presenteras som en färdig produkt eller kombineras med andra datakällor och analyseras vidare. En schematisk bild över stegen vid dataframställning ses i Figur 2.



Figur 2. Schematisk bild över dataframställning vid satellitövervakning.

Satelliter, sensorer och algoritmer utformas för specifika syften och den spektrala, temporala och spatials upplösningen definieras utifrån satellitens tänkta tillämpningsområde. Ett av de viktigaste stegen för att verifiera resultat från satelliter är jämförelser med traditionell vattenprovtagning för de parametrar som ska övervakas.

Odermatt *et al.* (2012) konstaterar att många framsteg gjorts inom satellitövervakning av inlandsvatten med optiskt komplexa egenskaper, där en del i svårigheten är att satellittekniken ursprungligen är framtagen och anpassad till förutsättningar som främst råder öppna hav (Matthews *et al.*, 2012; Mishra *et al.*, 2017). De olika färgbanden som finns i satelliten mäter olika absorptions och spridningsegenskaper och kan när de kombineras ge information om flera olika parametrar, som klorofyll och fykobiliner. Då det har en påverkan på slutresultaten behöver kombinationer av spektrala band göras med hänsyn tagen till vilken typ av vatten som ska studeras. (Johansen *et al.*, 2019).

Försvårande omständigheter vid satellitövervakning av sjöar beror inte bara på vattnets egenskaper, även kompositionen av atmosfäriska gaser och partiklar blir mer komplicerad över land, främst på grund av förekomsten av aerosoler och andra föroreningar orsakade av mänsklig aktivitet. När atmosfären förändras krävs avancerade korrektionsmetoder vid analys av det ljus som når satelliten, annars finns risk för att det inte går att avgöra om ljusspridning orsakats av sjö eller atmosfär (Mishra *et al.*, 2017). Utöver variationer i atmosfärsförhållanden kan även reflekterat ljus från omgivningen orsaka felaktiga resultat, framförallt över land på grund av topografiska skillnader (Mishra *et al.*, 2017).

1.4.3 Applicerad teknik för Mälaren

I denna studie undersöks klorofyll och cyanobakterier med satellit. Med hänsyn tagen till Mälarens förutsättningar har det vid bearbetning av data från sentinel-3/OLCI använts fyra huvudkomponenter:

- Bildbaserade kvalitetsflaggor (exempelvis identifiering av moln)
- Mätning av låg mängd klorofyll ($<10 \mu\text{g/l}$)
- Mätning av hög mängd klorofyll ($>10 \mu\text{g/l}$)
- Bildbaserad indikator för cyanobakterier

Kvalitetsflaggorna sorterar in pixlar i kategorier. Algoritmen använder indelningar som moln, klar-himmel-land, klar-himmel-vatten m.fl. (IdePix, 2020). Klar himmel vatten är den kategori som används för Mälaren.

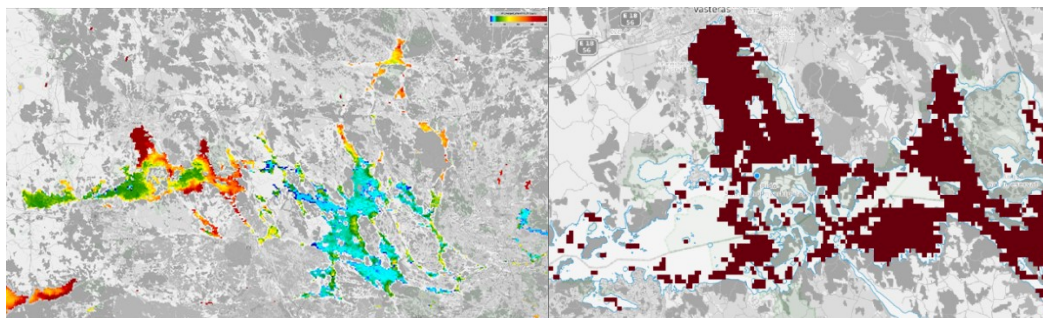
Den bildbaserade indikatorn för cyanobakterier använder en kombination av mängden klorofyll och fykobiliner för att identifiera pågående cyanobakterieblomningar (Matthews *et al.*, 2012). Indikatorn är binär och mängden cyanopigment kvantifieras inte i resultatet, en flagga för cyanobakterier antingen aktiveras eller förblir inaktiverad.

Mätning av klorofyll sker genom en kombination av två produkter. För mängder över 10 µg/l används algoritmen MPH (*Maximum Peak Height*), och för mängder under 10 µg/l det neurala nätverket C2RCC (*Case 2 Regional Coast Colour*). MPH har utvecklats för eutrofa inlandsvatten och kalibrering av klorofyll har utförts mot en stor mängd tillgängliga data från provtagningar i olika typer av sjöar (Matthews & Odermatt, 2014). MPH innehåller dessutom flaggan som används för att identifiera cyanobakterieblomningar. Algoritmen har visat sig speciellt tillförlitlig i eutrofa vatten och skiljer bl.a. makrofyter från ytansamlade cyanobakterier, vilket ger totalt fyra kategorier (Matthews & Odermatt, 2014):

- Eukaryota växtplankton under vattenytan
- Cyanobakterier eller cyanobakterier blandat med andra växtplankton under vattenytan
- Cyanobakterier nära eller på vattenytan
- Flytande makrofyter eller annan vegetation

C2RCC är ett så kallat neuralt nätverk, en form av klassificeringsmetod som bygger på träning baserat på ett stort referensmaterial (Brockmann *et al.*, 2016).

Resultat från satelliterna som använts för Mälaren kan efter vidare databearbetning presenteras i form av kartor som beskriver variationer i klorofyllmängd samt förekomster av cyanobakterier. I Figur 3 visas exempel på sådana kartor, där respektive färgsatt pixel motsvarar antingen en mängd klorofyll eller en indikering för cyanobakterier.



Figur 3. Exempel på kartor över Mälaren som inkluderar data från satellitövervakning. Färgsatta pixlar anger koncentrationen klorofyll (till vänster) eller flaggning för cyanobakterier (till höger), endast pixlar fria från moln och land får en färg. Bildkällor: Copernicus data (2020) bearbetad av CyanoAlert.

2 Metod

2.1 Data från provtagning i Mälaren

All data från vattenprovtagningar har hämtats från dataportalen Miljödata MVM¹ som visar resultat från miljöövervakning av sötvatten. Via webbsidan Fokus på Mälaren² finns ett förenklat söksätt för att få fram provtagningsanalyser från Mälaren. Sökningen kallas ”33 stationer som provtas i augusti” (SLU, 2020) och redovisar resultat från samtliga Mälarens provtagningsstationer i forskningssamarbetet mellan SLU och Mälarens vattenvårdsförbund. De data som använts till denna studie finns tillgänglig under produkterna växtplankton och vattenkemi.

2.2 Data från satellitövervakning

Data från vattenprovtagningar har genom angivna stationskoordinater matchats mot tillgänglig satellitdata av Petra Philipson, Brockmann Geomatics Sweden AB. För samtliga datum då vattenprovtagning utförts har satellitdata, om data funnits tillgänglig, sammanställts för vidare analys i denna studie.

2.3 Dataurval

Tidsperioden 2000-2019 har använts för den analys av data från provtagningar som genomförts utan jämförelse med satellitdata. Detta gäller bl.a. relationen mellan mängd klorofyll och biovolym växtplankton samt mängd klorofyll och

¹ <http://miljodata.slu.se/mvm/>

² <https://www.slu.se/malaren>

biovolym cyanobakterier. All data från växtplanktonprov som funnits tillgänglig hos SLU har laddats ned för perioden.

För jämförelser mellan satellit och provtagning har alla matchningar till datum analyserats vidare. Med matchning avses att både satellitdata och analysresultat från vattenkemi (klorofyll) eller växtplanktonprov funnits tillgängliga för samma stationskoordinater. Alla provtagningssäsonger som påbörjats och avslutats efter att Sentinel-3 togs i bruk har använts vid jämförelser, vilket motsvarar åren 2016-2019.

Både enskilda pixlar (300 x 300 m) och 3 x 3 pixlar centrerade runt stationskoordinaterna (900 x 900 m) har jämförts med provtagningar. Pixlar påverkade av moln/dis samt pixlar som helt eller delvis innehåller land filtreras bort, vilket gör att antalet godkända pixlar kan variera mellan 0-9 för olika dagar.

2.4 Dataanalys och kvalitetsgranskning

Determinationskoefficienten eller regressionens förklaringskraft (R^2) varierar mellan 0-1 och har beräknats i Microsoft Excel för linjära samband samt i JMP³ för logaritmiska samband. Signifikansnivå (p-värde) har beräknats i JMP.

Som underlag för visuell kvalitetsgranskning har satellitbilder från TARKKA⁴ använts. TARKKA är en webbtjänst som administreras av Finlands miljöcentral, SYKE. Bilder från Sentinel-2 och Sentinel-3 har granskats i syfte att öka förståelsen för vilka förhållanden som resulterar i att flaggan för cyanobakterier aktiveras. Sentinel-2 och Sentinel-3 registrerar data vid olika tidpunkter på dygnet men vanligtvis sker registrering med mindre än en timmes skillnad under förmiddagen. All satellitdata som jämförts med provtagningar i Mälaren kommer från Sentinel-3, men i den visuella kvalitetsgranskningen har primärt Sentinel-2 använts. Fördelen med Sentinel-2 är den betydligt högre upplösningen (20 x 20 m), vilket ger bilderna en bättre detaljrikedom.

³ JMP®, Version <x>. SAS Institute Inc., Cary, NC, 1989–2019

⁴ <https://www.wi4.ymparisto.fi/i4/eng/tarkka>

3 Resultat

3.1 Datatillgång

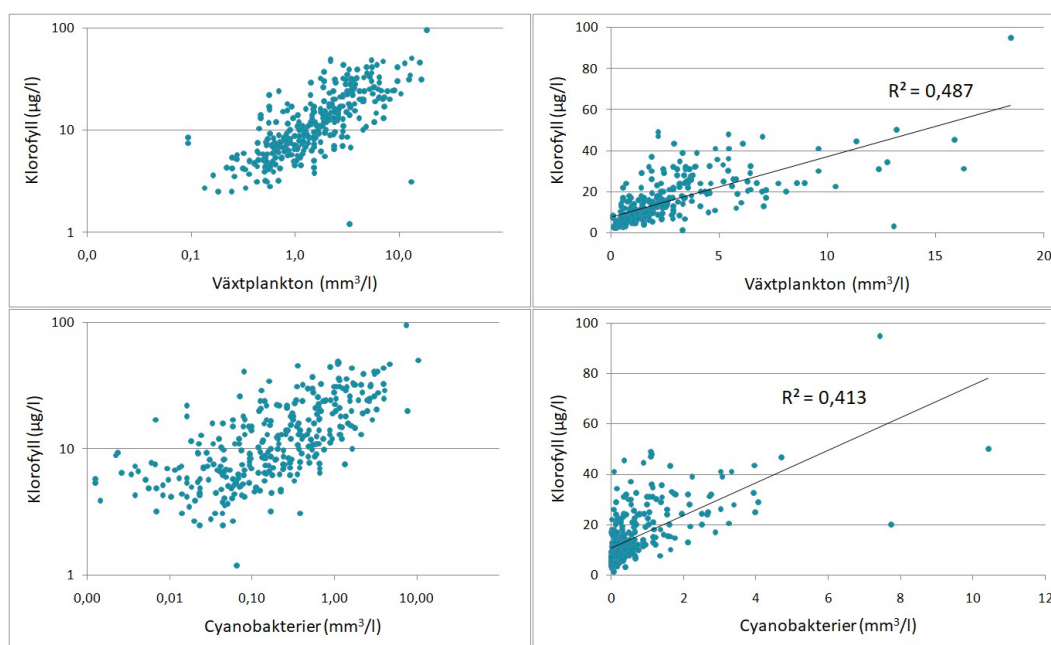
Av Mälarens 33 bassänger har endast 12 provtagits för klorofyll vid mer än ett tillfälle per säsong perioden 2016-2019, och totalt finns 306 prov för dessa år. Analys av samma period för växtplankton visar att 5 av 33 bassänger provtagits vid mer än ett tillfälle per säsong. För de fyra åren finns data från 89 växtplanktonprov, vid 79 av dessa tillfällen finns även analys av klorofyll för samma datum. För 22 av de 89 proven finns satellitdata från samma dag, vilket betyder att det i den undersökta perioden i genomsnitt finns fem växtplanktonprov per säsong som går att jämföra med satellitdata. För att undersöka kombinationen växtplankton och klorofyll mot satellitdata så sjunker genomsnittet till fyra prov per säsong. Om klorofyll studeras som ensam parameter kan fler jämförelser göras med satellitdata, matchning till datum finns då för 106 av totalt 306 prov, vilket motsvarar 34,6 %. Provtagningens fördelning samt antal tillgängliga matchningar för perioden finns listade i Tabell 4.

Tabell 4. Antal tillgängliga provtagningsanalyser från Mälaren samt möjliga matchningar till satellitdata för perioden 2016-2019.

Provtagningsstation	Provtagning klorofyll	Matchning till satellit klorofyll	Provtagning växtplankton	Matchning till satellit växtplankton
Blacken	20	10	2	1
Ekoln Vreta Udd	21	5	12	2
Galten	23	11	12	5
Gorran	3	1	1	-
Granfj. Djurgårds Udde	21	2	12	-
Görväln S	23	7	14	4
Långtarmen	3	1	2	1
Lårstaviken	3	-	1	-
Marielundsfjärden	3	-	2	-
Mälaren, Arnöfjärden	3	1	2	1
Mälaren, Brobyviken	3	-	2	-
Mälaren, Freden	3	1	-	-
Mälaren, Garnsviken	3	-	-	-
Mälaren, Gripsholmsviken	3	1	1	-
Mälaren, Hilleshögviken	3	-	1	-
Mälaren, Köpingsviken	3	-	-	-
Mälaren, Rödstensfjärden	3	1	-	-
Mälaren, Årstaviken	3	-	-	-
Mälaren-Ulvsundasjön	3	2	1	-
Oxfjärden	3	1	2	1
Prästfjärden	20	14	-	-
S. Björkfjärden SO	21	9	12	5
Skarven	23	4	-	-
Skofjärden	3	-	2	-
Stockholm D	3	2	-	-
Stora Ullfjärden	3	1	2	1
Strängnäs-fjärden	3	1	1	-
Svinnegarnsviken	21	14	-	-
Sörfjärden	6	-	1	-
Ulvhällsfjärden	21	7	-	-
Väsbyviken	3	1	1	-
Västeråsfjärden N	23	8	2	-
Västeråsfjärden S	3	1	1	1
Summa	306	106	89	22

3.2 Samband mellan parametrar

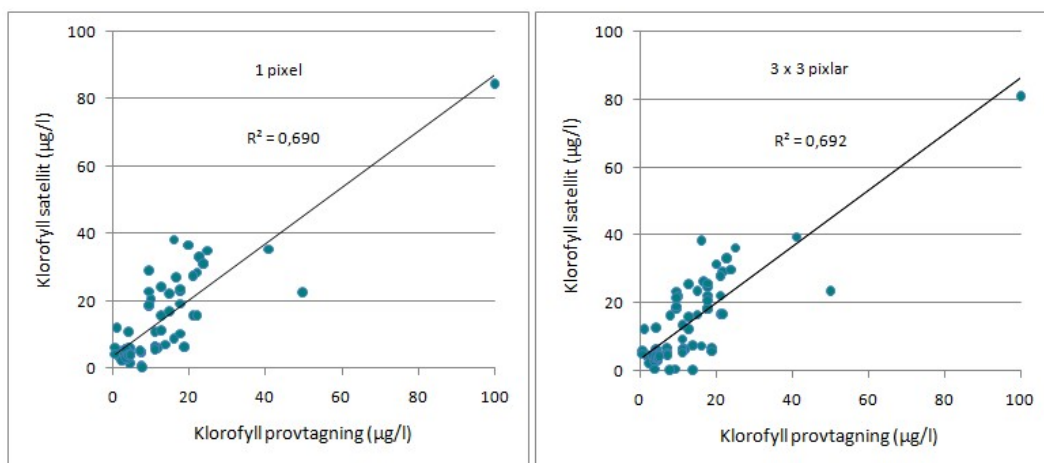
Samband mellan klorofyll och växtplankton samt klorofyll och cyanobakterier har undersökts för tidsperioden 2000-2019. Under denna period finns 335 provdatum med både biovolym växtplankton och mängd klorofyll. Den linjära relationen visar att variationen i klorofyll till nära hälften kan förklaras av mängden cyanobakterier ($R^2 = 0,413$) eller totala biovolymen växtplankton ($R^2 = 0,487$, Figur 4). Med samma data men logaritmiska axlar ökar förklaringsgraden för växtplankton-klorofyll till 57 %, och vid exkludering av fyra avvikande värden ytterligare till 65 %. För cyanobakterier-klorofyll ökar förklaringsgraden något mindre till 46 % med logaritmiska axlar. Ingen exkludering av avvikande värden har gjorts då spridningen generellt är större än den för växtplankton.



Figur 4. Logaritmiskt respektive linjärt samband mellan total biovolym växtplankton och klorofyll, samt biovolym cyanobakterier och klorofyll. Diagrammen redovisar data från fältbaserad provtagning i Mälaren för säsongerna 2000-2019, p -värde $<0,0001$ (gäller samtliga samband).

Vid jämförelse av mängder klorofyll uppmätta vid provtagning och satellit har värden från de enskilda pixlarna med stationskoordinaterna varit högre än provtagna värden vid 42 av 74 tillfällen, för 3 x 3 pixlar var 47 av 86 värden högre via satellit. Spridningsmönstret är därmed inte sådant att resultat från satelliten konsekvent alltid varit högre eller lägre än de värden som uppmäts vid

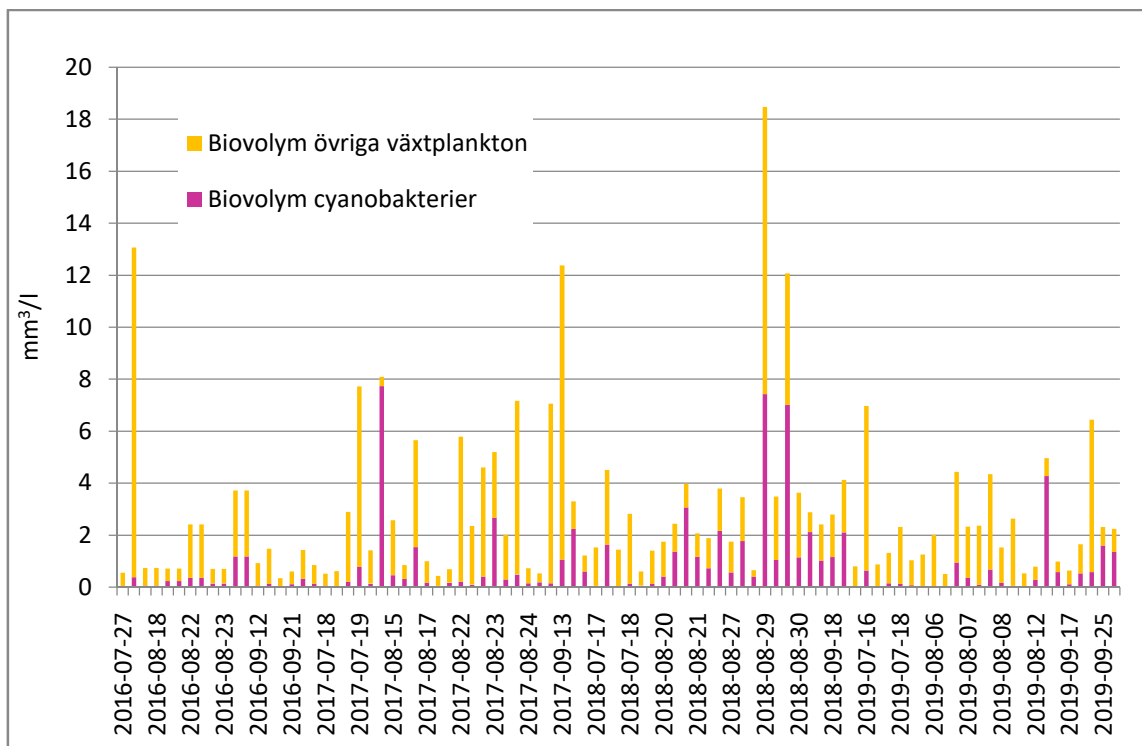
provtagning. Linjära samband mellan klorofyll uppmätt vid provtagning och klorofyll uppmätt via satellit redovisas i Figur 5. Förklaringsgraden för de enskilda pixlarna är $R^2 = 0,690$ och för medelvärdet av de tillgängliga 3 x 3 pixlarna $R^2 = 0,692$. Skillnaden mellan resultaten för 300 x 300 m och 900 x 900 m är därmed försumbar.



Figur 5. Samband mellan klorofyllvärden uppmätta vid analys av vattenkemiprover från Mälaren och via satellit. Endast datum där både vattenprov och satellitbild funnits tillgängliga har använts, undersökt period 2016-2019, p -värde $< 0,0001$ (gäller både en pixel och 3 x 3 pixlar)

Klorofyll används ofta som en indikator för mängden växtplankton då planktonanalyser inte finns tillgängliga. Klorofyllmängden ger dock ingen information om artsammansättningen av växtplankton. Artbestämning är fördelaktigt för att fastställa fördelningen mellan cyanobakterier och övriga växtplankton.

I Figur 6 redovisas fördelningen mellan cyanobakterier och övriga växtplankton för provtagningar 2016-2019 i månaderna juli-september. Under denna period utgörs 40 % av den totala biovolymen av cyanobakterier. Vid avgränsning till augusti månad är motsvarande siffra 55 %, vilket gör augusti till den månad då andelen cyanobakterier är som högst.



Figur 6. Andel cyanobakterier i relation till totala mängden växtplankton i Mälaren 2016-2019, varje stapel representerar en provtagningsstation.

Sett till biovolym är kiselalger (*Bacillariophyta*) och cyanobakterier de vanligast förekommande artgrupperna växtplankton i Mälaren. Vid analys av de 30 högst registrerade biovolymerna för enskilda artgrupper bland övrigt växtplankton 2000-2019 återfinns dinoflagellater (*Dinophyceae*) vid ett tillfälle, resterande 29 tillfällen består av kiselalger. Datum med höga halter kiselalger förekommer i juli men är betydligt vanligare under vår/försommar och sensommar/höst. Vilket motsvarar april, maj, senare hälften av augusti samt september (Tabell 5).

Tabell 5. Resultat från provtagning i Mälaren, redovisning av 30 analyser med högst biovolym för en artgrupp växtplankton under 2000-2019 (cyanobakterier har inte inkluderats).

Stationsnamn	Provdatum	Taxonnamn	Biovolym (mm ³ /l)	Artgrupp
Galten	2011-09-20	Stephanodiscus rotula	10,6	Bacillariophyta
S. Björkfjärden SO	2016-07-29	Ceratium hirundinella	9,9	Dinophyceae
Ekoln Vreta Udd	2017-05-15	Stephanodiscaceae	9,8	Bacillariophyta
Galten	2018-08-29	Stephanodiscaceae	9,8	Bacillariophyta
Galten	2017-09-13	Stephanodiscaceae	9,5	Bacillariophyta
Galten	2011-08-17	Stephanodiscus rotula	9,3	Bacillariophyta
S. Björkfjärden SO	2019-04-24	Stephanodiscaceae	8,3	Bacillariophyta
Granfj. Djurgårds Udde	2011-09-20	Stephanodiscus rotula	8,0	Bacillariophyta
Ekoln Vreta Udd	2006-07-12	Diatoma tenuis	8,0	Bacillariophyta
Galten	2001-05-31	Aulacoseira subarctica	7,4	Bacillariophyta
Granfj. Djurgårds Udde	2017-04-25	Aulacoseira islandica	7,0	Bacillariophyta
Granfj. Djurgårds Udde	2017-09-12	Stephanodiscaceae	6,5	Bacillariophyta
Galten	2010-07-14	Aulacoseira granulata	6,2	Bacillariophyta
Oxfjärden	2017-08-24	Stephanodiscaceae	6,0	Bacillariophyta
Galten	2011-05-31	Aulacoseira granulata	5,9	Bacillariophyta
Galten	2007-05-24	Aulacoseira subarctica	5,9	Bacillariophyta
Galten	2009-07-16	Aulacoseira islandica	5,7	Bacillariophyta
Galten	2012-08-08	Aulacoseira islandica	5,7	Bacillariophyta
Görväln S	2012-05-16	Aulacoseira islandica	5,6	Bacillariophyta
Granfj. Djurgårds Udde	2017-05-17	Aulacoseira islandica	5,6	Bacillariophyta
Granfj. Djurgårds Udde	2017-08-22	Stephanodiscaceae	5,2	Bacillariophyta
Görväln S	2011-04-27	Aulacoseira islandica	5,2	Bacillariophyta
Galten	2011-05-31	Aulacoseira islandica	5,2	Bacillariophyta
Görväln S	2008-04-23	Aulacoseira islandica	4,7	Bacillariophyta
Galten	2009-05-29	Aulacoseira islandica	4,6	Bacillariophyta
Galten	2017-07-19	Stephanodiscaceae	4,5	Bacillariophyta
Granfj. Djurgårds Udde	2011-08-16	Stephanodiscus rotula	4,4	Bacillariophyta
Görväln S	2019-04-24	Stephanodiscaceae	4,2	Bacillariophyta
Galten	2009-09-08	Aulacoseira granulata	4,2	Bacillariophyta
S. Björkfjärden SO	2017-04-25	Aulacoseira islandica	4,1	Bacillariophyta

När samma period (2000-2019) analyserades för höga volymer cyanobakterier visar resultatet en klar överrepresentation i de västligt belägna bassängerna Västeråsfjärden N, Galten och Svinnegarnsviken. Då samtliga tre bassänger är grunda har provtagning främst utförts med blandprov 0-2 m, istället för 0-8 m som är vanligast bland de djupare bassängerna. Av de 30 högst registrerade biovolymerna återfinns 23 i antingen Västeråsfjärden N, Galten eller Svinnegarnsviken (Tabell 6). Resultaten i Tabell 6 visar även att augusti är den

vanligaste månaden med höga volymer cyanobakterier, 22 av 30 tillfällen återfinns i augusti.

Tabell 6. Resultat från provtagning i Mälaren, redovisning av 30 enskilda analyser med högst biovolym cyanobakterier under 2000-2019. Taxon varierar mellan släkte och art då artbestämning inte alltid är möjligt.

Stationsnamn	Provdatum	Taxonnamn	Biovolym (mm ³ /l)	Artgrupp
Västeråsfjärden N	2002-08-14	Aphanizomenon flosaquae	9,1	Cyanobacteria
Galten	2014-07-30	Aphanizomenon	7,8	Cyanobacteria
Västeråsfjärden N	2002-08-14	Aphanizomenon flosaquae	6,8	Cyanobacteria
Galten	2003-08-13	Aphanizomenon klebahnii	6,5	Cyanobacteria
Västeråsfjärden N	2003-08-12	Aphanizomenon klebahnii	5,9	Cyanobacteria
Stora Ullfjärden	2017-08-14	Planktothrix agardhii	5,2	Cyanobacteria
Svinnegarnsviken	2012-09-12	Pseudanabaena limnetica	5,1	Cyanobacteria
Svinnegarnsviken	2012-08-09	Pseudanabaena limnetica	4,4	Cyanobacteria
Galten	2003-07-29	Aphanizomenon klebahnii	4,2	Cyanobacteria
Svinnegarnsviken	2013-08-29	Pseudanabaena limnetica	4,2	Cyanobacteria
Väsbyviken	2018-08-29	Pseudanabaena	4,2	Cyanobacteria
Västeråsfjärden N	2002-08-14	Aphanizomenon klebahnii	3,8	Cyanobacteria
Galten	2018-08-29	Aphanizomenon klebahnii	3,8	Cyanobacteria
Svinnegarnsviken	2012-08-02	Pseudanabaena limnetica	3,7	Cyanobacteria
Svinnegarnsviken	2002-08-14	Aphanizomenon flosaquae	3,3	Cyanobacteria
Galten	2003-08-13	Aphanizomenon klebahnii	3,3	Cyanobacteria
Galten	2003-07-29	Aphanizomenon klebahnii	3,2	Cyanobacteria
Stora Ullfjärden	2019-08-12	Planktothrix agardhii	3,2	Cyanobacteria
Västeråsfjärden N	2002-08-01	Aphanizomenon flosaquae	3,1	Cyanobacteria
Granfj. Djurgårds Udde	2001-09-26	Limnothrix planctonica	3,0	Cyanobacteria
Galten	2013-07-30	Aphanizomenon klebahnii	2,7	Cyanobacteria
Svinnegarnsviken	2000-08-16	Aphanizomenon flosaquae	2,7	Cyanobacteria
Granfj. Djurgårds Udde	2006-08-14	Aphanizomenon	2,7	Cyanobacteria
Västeråsfjärden N	2006-08-15	Pseudanabaena limnetica	2,6	Cyanobacteria
Galten	2018-08-29	Dolichospermum macrosporum	2,6	Cyanobacteria
Galten	2002-08-14	Aphanizomenon flosaquae	2,6	Cyanobacteria
Ulvhällsfjärden	2013-08-27	Pseudanabaena limnetica	2,5	Cyanobacteria
Ulvhällsfjärden	2006-09-12	Pseudanabaena limnetica	2,4	Cyanobacteria
Svinnegarnsviken	2007-09-19	Limnothrix planctonica	2,3	Cyanobacteria
Västeråsfjärden N	2000-08-16	Aphanizomenon flosaquae	2,3	Cyanobacteria

Under den kortare perioden (2016-2019) då satellitdata finns tillgänglig har biovolym av enskilt släkte eller art cyanobakterier överstigande 1 mm³/l registrerats vid 16 tillfällen (Tabell 7).

Tabell 7. Resultat från provtagning i Mälaren, redovisning av enskilda analyser med biovolym cyanobakterier överstigande 1 mm³/l under perioden 2016-2019. Taxon varierar mellan släkte och art då artbestämning inte alltid är möjligt.

Stationsnamn	Provdatum	Taxonnamn	Biovolym (mm ³ /l)
Stora Ullfjärden	2017-08-14	Planktothrix agardhii	5,2
Väsbyviken	2018-08-29	Pseudanabaena	4,2
Galten	2018-08-29	Aphanizomenon klebahnii	3,8
Stora Ullfjärden	2019-08-12	Planktothrix agardhii	3,2
Galten	2018-08-29	Dolichospermum macrosporum	2,6
Ekoln Vreta Udd	2018-08-21	Limnothrix planctonica	2,3
Ekoln Vreta Udd	2018-09-13	Limnothrix planctonica	1,7
Galten	2018-09-18	Aphanizomenon	1,6
Stora Ullfjärden	2017-08-14	Limnothrix planctonica	1,3
Strängnäs-fjärden	2018-08-28	Limnothrix	1,3
Ekoln Vreta Udd	2017-09-14	Pseudanabaena limnetica	1,2
Mälaren, Hilleshögviken	2018-08-27	Pseudanabaena	1,1
Väsbyviken	2018-08-29	Cuspidothrix issatschenkoi	1,1
Västeråsfjärden N	2017-08-23	Microcystis	1,1
Ekoln Vreta Udd	2019-09-25	Synechococcales	1,0
Stora Ullfjärden	2017-08-14	Aphanizomenon	1,0

3.3 Identifiering av cyanobakterier med satellit

För undersökningsperioden 2016-2019 har det vid tio tillfällen funnits data från provtagningar tillgänglig då satelliten flaggat för cyanobakterieblomning med pixeln som innehåller provtagningskoordinaterna (Tabell 8). Analys av klorofyll saknas endast för ett av datumen medan växtplanktonanalys bara genomförts vid två tillfällen. Det ena tillfället uppmättes den högsta mängden cyanobakterier för hela perioden 7,7 mm³/l, motsvarande 96 % av den totala biovolymen växtplankton. Vid det andra tillfället var mängden cyanobakterier väldigt låg 0,1 mm³/l, motsvarande 7 % av den totala biovolymen växtplankton. Visuell granskning av satellitbilder från TARKKA visar att det trots låg volym cyanobakterier finns tydliga ytansamlingar vid detta datum. Även vid flera av de andra tillfällena då flaggan för cyanobakterier aktiverats kan ytansamlingar ses vid granskning av satellitbilder.

Tabell 8. Tillfällen då flaggan för cyanobakterier aktiverats för Mälaren vid datum som provtagningsanalyser funnits tillgängliga 2016-2019, endast pixeln med stationskoordinaterna har använts.

Stationsnamn	Provdatum	Biovolym totalt (mm ³ /l)	Biovolym cyanobakterier (mm ³ /l)	Klorofyll (µg/l)	Kommentar
Ulvhällsfjärden	2019-09-17	-	-	18	Molnigt (kommentar från provtagning "inga ytansamlingar")
Galten	2019-04-25	-	-	9,7	Slöjmoln och suspenderade partiklar
Västeråsfjärden N	2018-07-18	-	-	13	Slöjmoln
Blacken	2018-05-16	-	-	4,5	Slöjmoln
Skarven	2017-08-15	-	-	16	Slöjmoln
Stora Ullfjärden	2017-08-14	8,1	7,7	20	Omblandat ytskikt
Galten	2016-09-12	1,5	0,1	-	Ytansamlingar
Västeråsfjärden N	2016-08-23	-	-	23	Stackmoln, ytansamlingar
Blacken	2016-08-22	-	-	22	Ytansamlingar
Galten	2016-07-29	-	-	15	Slöjmoln, svårbedömt

När 3 x 3 pixlar används finns ytterligare 14 cyanoflaggningar vilket ger totalt 24 för perioden 2016-2019. Av dessa 24 tillfällen finns fem datum med växtplanktonprov, två återfinns i Tabell 8 och ytterligare ett i Tabell 9, där summerade biovolym cyanobakterier överstigande 1 mm³/l redovisas för 2016-2019. Den lägsta volym som undersöks är satt till hälften av 2 mm³/l, vilket är gränsen WHO använder för att minimera hälsorelaterade problem (Sonesten, 2013). Vid övriga två tillfällen som inte redovisas i någon tabell, har volymen cyanobakterier varit lägre (0,5 respektive 0,1 mm³/l). Båda gångerna har 2 av 9 pixlar varit användbara varav en av pixlarna flaggat för cyanobakterieblomning. När volymen cyanobakterier varit 1 mm³/l eller mer vid provtagning finns klorofyllmätningar från satellit endast för två av datumen. Cyanoflaggan har aktiverats båda gångerna, för 5 av 7 respektive 8 av 8 pixlar. Granskning av satellitbilder visar att samtliga tillfällen då klorofyllmätning/cyanoindikering inte varit möjlig berott på molniga förhållanden (Tabell 9).

Tabell 9. Provtagningar i Mälaren 2016-2019 där den summerade biovolymen cyanobakterier uppgått till 1 mm³/l eller mer. Endast vid två tillfällen har klorofyllmängd varit möjligt att mäta via satellit och båda dessa tillfällen har flaggan för cyanobakterier aktiverats. Övriga datum begränsas av molniga förhållanden.

Stationsnamn	Provdatum	Biovolym växtplankton totalt (mm ³ /l)	Biovolym cyanobakterier (mm ³ /l)	Klorofyll (µg/l)	Kommentar
Stora Ullfjärden	2017-08-14	8,1	7,7	20	Cyanoflagga 1 pixel & 3 x 3 pixlar
Galten	2018-08-29	18,5	7,4	95	Molntäcke
Väsbyviken	2018-08-29	12,1	7,0	-	Molntäcke
Stora Ullfjärden	2019-08-12	5,0	4,3	-	Molntäcke
Ekoln Vreta Udd	2018-08-21	4,0	3,1	39	Satellitbild saknas hos TARKKA
Västeråsfjärden N	2017-08-23	5,2	2,7	25	Molnigt
Ekoln Vreta Udd	2017-09-14	3,3	2,2	39	Molntäcke
Mälaren, Hilleshögviken	2018-08-27	3,8	2,2	28	Molnigt
Ekoln Vreta Udd	2018-09-13	2,9	2,1	32	Satellitbild saknas hos TARKKA
Galten	2018-09-18	4,1	2,1	13	Satellitbild saknas hos TARKKA
Strängnäsfiärden	2018-08-28	3,5	1,8	32	Molntäcke
Galten	2018-07-17	4,5	1,6	10	Slöjmoln
Ekoln Vreta Udd	2019-09-25	2,3	1,6	20	Molntäcke
Skofjärden	2017-08-15	5,7	1,5	26	Molnigt
Lårstaviken	2018-08-20	2,4	1,4	29	Molntäcke
Görväln S	2019-09-25	2,2	1,4	18	Molntäcke
Galten	2016-08-23	3,7	1,2	18	Cyanoflagga 3 x 3 pixlar, stackmoln
Görväln S	2018-08-21	2,1	1,2	13	Satellitbild saknas hos TARKKA
Granfj. Djurgårds Udde	2018-09-18	2,8	1,2	21	Satellitbild saknas hos TARKKA
Granfj. Djurgårds Udde	2018-08-30	3,6	1,2	31	Molntäcke
Galten	2017-09-13	12,4	1,1	31	Molntäcke
Västeråsfjärden N	2018-08-29	3,5	1,0	25	Molntäcke
Görväln S	2018-09-17	2,4	1,0	20	Satellitbild saknas hos TARKKA

4 Diskussion

För att verifiering av satellitdata ska vara möjlig krävs att tillförlitliga och jämförbara mätvärden från vattenprovtagningar finns tillgängliga. Det är främst moln som begränsar tillgängligheten av satellitdata, förutsatt att de pixlar som används endast inkluderar vatten. Medan begränsningen för vattenprovtagning främst beror på provtagningsfrekvens. Provtagning av klorofyll sker oftare och i fler bassänger än växtplankton men kan endast ge en generell uppskattning för den totala mängden växtplankton, vilket speciellt i verifieringsskedet kan vara en brist när cyanobakterier önskas skiljas ut från övrigt växtplankton.

Resultaten visar på starka samband ($R^2 = 0,69$) mellan uppmätningar av mängd klorofyll via satellit och provtagningar, vilket tyder på hög tillförlitlighet för registrerade klorofyllvärden för satelliten. Samtidigt bör tolkning av resultaten, som erhållits via direkt jämförelse, ske med viss försiktighet. Dels på grund av att antal matchningar är få, men även i de fall då fler än en pixel använts och kanske speciellt när många pixlar filtreras bort. Lokala variationer i klorofyllmängd förekommer och skillnader kan finnas även i näraliggande områden.

Denna studie visar även på relativt likvärdiga resultat för samband mellan biovolym växtplankton och klorofyll samt biovolym cyanobakterier och klorofyll. Klorofyll ensamt är därför inte en bra förklaringsparameter för mängden cyanobakterier, vilket ytterligare styrks av stora skillnader i andel cyanobakterier i relation till totala mängden växtplankton över tid. Skillnader som förekommer även i månader där cyanobakterier är mer vanligt förekommande. Därmed finns ett behov av att undersöka och utvärdera ytterligare parametrar för att särskilja cyanobakterier från övrigt växtplankton vid satellitövervakning. En lämplig parameter kan sannolikt vara mängd fykobiliner, vilket inte berörts i denna studie. Vid en sådan undersökning kan det exempelvis utredas om det finns skillnader i

mängd fykocyanin mellan arter, och om det i sådant fall har någon påverkan på när flaggningar sker för cyanobakterieblomningar.

Det finns få matchningar till datum mellan provtagningar och satellitdata, vilket försvårar möjligheten att dra trovärdiga slutsatser i denna studie. Så länge tekniken fungerar finns daglig data tillgänglig via satellit om vädret är klart. Provtagning sker dock relativt sällan och inte alltid i klart väder. För undersökningsperioden kan en tredjedel av klorofyllproven och en fjärdedel av växtplanktonproven matchas till satellitdata. Vilket handlar om ett fåtal tillfällen per år. Fler matchande datum är nödvändigt för att genom provtagningsanalyser kunna dra några slutsatser om hur tillförlitlig satellitens indikering för cyanobakterieblomningar är.

För perioden 2000-2019 visar provtagningar en kraftig överrepresentation av höga volymer cyanobakterier i Mälarens västliga delar. En lika tydlig trend kan inte ses för de data från satellitövervakning eller provtagning som undersökts för den kortare perioden 2016-2019, vilket sannolikt beror på att datamängden är mindre. Orsaker till att fler cyanobakterieblomningar kan ses i Mälarens västra delar kan vara flera; exempelvis att bassängerna är grunda, att provtagning sker oftare i vissa bassänger än andra och/eller att näringstillförseln är högre. Med mer data från längre övervakningsperioder kan det vara möjligt att använda satelliter för att bedöma sannolikheten för cyanobakterieblomningar i olika bassänger, även utan verifiering via jämförelser med omfattande provtagningar. Ett sådant underlag kan sedan användas för att besluta om riktade provtagningar i högre frekvens. Mer satellitdata finns redan idag att undersöka. Många cyanoflaggningar har uteslutits från denna studie på grund av rumslig avgränsning och krav på datummatchning med provtagningar.

Satellitövervakning och vattenprovtagning är två skilda metoder med olika förutsättningar. Provtagning sker punktvís medan satelliten täcker in en betydligt större yta per pixel, vilket medför att en direkt jämförelse ofta kan vara olämplig. Endast vid två tillfällen då flaggan för cyanobakterieblomning aktiverats finns växtplanktonanalyser tillgängliga, det ena tillfället uppmättes $7,7 \text{ mm}^3/\text{l}$ cyanobakterier (högst för perioden) i Stora Ullfjärden, det andra $0,1 \text{ mm}^3/\text{l}$ i Galten. Ett innehåll på $0,1 \text{ mm}^3/\text{l}$ cyanobakterier kan vara lätt att avfärda som för

lågt för att det ska handla om en blomning, men vid granskning av satellitbilder syns tydliga tecken på cyanobakterieblomningar vid båda dessa tillfällen. I Stora Ullfjärden som ett väl omblandat ytskikt och i Galten som vidsträckta ytliga ansamlingar. Resultaten indikerar att satellitövervakning och provtagning, även om jämförelser både är nödvändiga och fördelaktiga, behöver hanteras och analyseras som två olika metoder. Vidare analyser kan ge värdefull insikt i verifieringen av satellitdata, även när det handlar om data som vid jämförelse initialt kan uppfattas vara felaktig.

Att satellitdata och provtagningsanalyser skiljer sig åt kan också förklaras av andra orsaker, exempelvis att data endast matchats till dag inte tidpunkt. Flera förhållanden med påverkan på mängden cyanobakterier och klorofyll kan ändras snabbt. Variationer i vind, vågrörelser samt nivån av biologisk aktivitet kan alla orsaka skillnader i resultaten. Provtagning för växtplankton sker dessutom ofta på djup dit satelliten delvis inte når, vilket bl.a. gäller vanliga blandprov 0-8 m. Satellitens sensorer registrerar endast information från de allra ytligaste metrarna (Harvey *et al.*, 2015) och begränsas av siktdjupet. Hur växtplankton och cyanobakterier fördelar sig i vattenpelaren har därför betydelse för resultaten. I grundare bassänger där provtagningsdjupet är 0-2 m kan upprörning av sediment från botten och andra suspenderade partiklar innebära försvårande omständigheter. Detta kan även resultera i att flaggningar för cyanobakterieblomning från satelliten blir svåra att utvärdera genom visuell granskning av satellitbilder.

Trots att den traditionella provtagningen är en etablerad metod finns det inte heller något som säger att metoden är optimal för alla typer av förhållanden. Förutom att vara kostsam och tidskrävande menar Richardson (1996) att traditionell provtagning dessutom inte nödvändigtvis ger en representativ bild av rådande förhållanden i den sjö som provtas. Detta styrks av Tikkanen & Willén (1992) som menar att en mer rättvisande bild för växtplanktonfördelningar kan fås genom att blanda prov från olika platser i horisontalplanet. Framtida utredningar skulle kunna använda och utvärdera satellitdata för större områden, exempelvis hela bassänger. Och om flertalet pixlar indikerar för cyanobakterieblomning skulle provtagningar i realtid kunna genomföras i syfte att verifiera resultaten från

satelliten. Denna typ av mer flexibel provtagning kan sannolikt vara mycket värdefull för utvecklingen av satellitövervakning som metod för att identifiera cyanobakterieblomningar.

Med mer tillgänglig data kan det också vara intressant att studera artsammansättningen av växtplankton. Enligt Binding *et al.* (2019) har mycket forskning gjorts kring *Microcystis* ljusspridande egenskaper, långt mer än vad som exempelvis gjorts för *Planktothrix*. Om algoritmer anpassas till egenskaper som är framträdande endast hos vissa släkten kan cyanobakterieblomningar för arter inom andra släkten bli svårare att upptäcka. Även vid tillfällen när det uppstår en mix av många olika arter växtplankton har det identifierats ett potentiellt problem för satelliten att urskilja cyanobakterier. Anledningen till det är att den optiska signalen främst representerar den mest dominanta artgruppen växtplankton (Mishra *et al.*, 2017).

Förutsatt att satellitövervakning ger tillräckligt bra och tillförlitliga resultat finns ändå mycket att vinna i etablering och användning av metoden i syfte att upptäcka cyanobakterieblomningar. Satelliternas dagliga återkomst erbjuder trots förekomster av moln en mycket bättre upplösning i tid och rum än dagens traditionella provtagningsprogram. Utöver den låga provtagningsfrekvensen sker idag exempelvis ingen provtagning alls i juni. Juni är en månad där cyanobakterieblomningar skulle kunna uppstå, liksom i oktober som ligger utanför dagens provtagningsssäsong. I oktober år 2000 uppmättes i Mälaren toxinhalter så höga som 3 µg/l (Willén, 2001), och sannolikt är det inte enda tillfället utanför ordinarie provtagningsssäsong. Toxiska cyanobakterieblomningar är dessutom ofta relativt snabbt övergående (Willén, 2001), vilket gör att de lätt kan missas med en låg provtagningsfrekvens.

I ett varmare klimat finns det även en risk för att antalet cyanobakterieblomningar ökar. Detta eftersom cyanobakterier till skillnad från kiselalger, den andra vanligt förekommande artgruppen växtplankton i Mälaren, drar fördel av högre temperaturer (Wetzel, 2001; Klemas, 2012). Högre temperaturer kan orsaka förlängda perioder med temperaturskiktning, vilket bidrar till att näringsinnehållet i ytvattnet minskar. Det skulle i sådant fall gynna somliga arter cyanobakterier i konkurrensen med andra växtplankton.

5 Slutsats

Förekomsten av moln och andra ogynnsamma atmosfäriska förhållanden försvårar möjligheten att hitta tillfällen där provtagningar och satellitdata finns för samma datum, även när det handlar om tidsperioder på flera år. Trots de begränsningar som finns verkar satellitövervakning vara en lovande metod för att mäta mängden klorofyll och flagga för cyanobakterieblomningar. Mer verifiering är dock nödvändig, speciellt för analysen av cyanobakterier, där mängden tillgänglig data för jämförelser var begränsad och ytterligare parametrar som fykobiliner kan behöva undersökas djupare. Utöver jämförelser av data mellan de två metoderna är granskning av satellitbilder ett bra hjälpmedel för att utvärdera resultat från satellitövervakning. Satellitbilder ger en översiktssbild som inte är möjlig att framställa genom den traditionella provtagningen. En granskning som inte begränsas av matchande datum för provtagning möjliggör även för analys av fler indikeringar för cyanobakterier från satellit.

Satellitövervakning kommer aldrig fullt ut ersätta traditionell provtagning men bör ses som ett värdefullt komplement vid identifiering av cyanobakterieförekomster, framförallt vid kartläggningar av ytliga cyanobakterieblomningar, där metoden sannolikt till och med kan visa sig fungera bättre än den traditionella provtagningen. I studier som denna är dock långa tidsserier något mycket värdefullt och en tillräcklig mängd data är nödvändigt för att kunna komma fram till trovärdiga slutsatser. Då det visat sig finnas få datum där jämförelser varit möjliga i den undersökta perioden, så rekommenderas att fortsätta med motsvarande undersökning även kommande år.

Referenser

- Bernes, C. 2005: *Förändringar under ytan: Sveriges havsmiljö granskad på djupet*. Naturvårdsverket, Fälth & Hässler, Värnamo.
- Bernes, C. 2011: *Biologisk mångfald i Sverige*. Naturvårdsverket, Elanders Fälth & Hässler, Mölnlycke.
- Binding C.E., Zastepa, A., Zeng, C. 2019: The impact of phytoplankton community composition on optical properties and satellite observations of the 2017 western Lake Erie algal bloom, *Journal of great lakes research* 45: 573-586.
- Brockmann, C., Doerffer, R., Peters, M., Stelzer, K., Embacher, S., Ruescas, A. 2016: Evolution of the C2RCC neural network for Sentinel 2 and 3 for the retrieval of Ocean colour products in normal and extreme optically complex waters, *Proceeding of living planet symposium* (Prague: ESA SP-740).
- Dokulil, M.T. & Teubner, K. 2000: Cyanobacterial dominance in lakes, *Hydrobiologia* 438: 1-12.
- Dörnhöfer, K., Klinger, P., Heege, T., Oppelt, N. 2018: Multi-sensor satellite and *in situ* monitoring of phytoplankton development in a eutrophic-mesotrophic lake, *Science of the total environment* 612: 1200-1214.
- ESA 2020a: ESA online, The Sentinel missions. ESA (European Space Agency), http://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus/Overview4 Besökt 2021-03-27
- ESA 2020b: Sentinel online, Coverage. ESA (European Space Agency), <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-3-olci/coverage> Besökt 2020-03-23.
- ESA 2020c: Sentinel online, Heritage. ESA (European Space Agency), <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-3-olci/overview/heritage> Besökt 2020-03-21.
- ESA 2020d: Sentinel online, Overview. ESA (European Space Agency), <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-3-olci/overview> Besökt 2020-03-21.
- Granéli, E. & Turner, J. T. (red.) 2006: *Ecology of harmful algae*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, The Netherlands.

- Harvey, E.T., Kratzer, S., Philipson, P. 2015: Satellite-based water quality monitoring for improved spatial and temporal retrieval of chlorophyll-a in coastal waters, *Remote sensing of environment*, Vol. 158: 417-430.
- HaV 2020: Metoder och undersökningstyper för miljöövervakning inom programområde sötvatten, Havs- och vattenmyndigheten, <https://www.havochvatten.se/hav/vagledning--lagar/vagledningar/ovriga-vagledningar/miljoovervakningens-metoder-och-undersokningstyper-inom-programomrade-sotvatten.html> Besökt 2020-03-31.
- IdePix 2020: Identification of pixel properties, Brockmann Consult, <https://www.brockmann-consult.de/portfolio/idepix/> Besökt 2020-04-02.
- Johansen, R., Beck, R., Nowosad, J., Nietch, C., Xu, M., Shu, S., Yang, B., Liu, H., Emery, E., Reif, M., Harwood, J., Young, J., Macke, D., Martin, M., Stillings, G., Stumpf, R., Su, H. 2018: Evaluating the portability of satellite derived chlorophyll- α algorithms for temperate inland lakes using airborne hyperspectral imagery and dense surface observations, *Harmful algae* 76: 35-46.
- Johansen, R.A., Reif, M., Emery, E., Nowosad, J., Beck, R., Xu, M., Liu, H. 2019: Waterquality: An open-source R package for the detection and quantification of cyanobacterial harmful algal blooms and water quality, U.S. Army research and development center, Final report, ERDC/EL TR-19-20.
- Klemas, V. 2012: Remote sensing of algal blooms: An overview with case studies, *Journal of coastal research*, Vol. 28, No. 1A: 34-43.
- Larson, D., Ahlgren, G., Willén, E. 2014: Bioaccumulation of microcystins in the food web: A field study of four Swedish lakes, *Inland waters* 4: 91-104.
- Livsmedelsverket 2018: Handbok dricksvattenrisker, Cyanotoxiner i dricksvatten, PDF, ISSN 1104-7089, www.livsmedelsverket.se/publicerat-material/
- Markensten, H. 2006: Climate effects on early phytoplankton biomass over three decades modified by the morphometry in connected lake basins, *Hydrobiologia* 559: 319-229.
- Mishra, D. R., Ogashawara, I. & Gitelson, A. A. (red.) 2017: *Bio-optical modeling and remote sensing of inland waters*, Elsevier, Amsterdam, E-book.
- Mishra, S., Stumpf, R.P., Schaeffer, B.A., Werdell, P.J., Loftin, K.A., Meredith, A. 2019: *Scientific reports* 9, Article No. 18310, <https://doi.org/10.1038/s41598-019-54453-y>
- Matthews, M. W., Bernard, S., Robertson, L. 2012: An algorithm for detecting trophic status (chlorophyll-*a*), cyanobacterial-dominance, surface scums and floating vegetation in inland and coastal waters, *Remote sensing of environment*, Vol. 124: 637-652.
- Matthews, M. W., Odermatt, D. 2014: Improved algorithm for routine monitoring of cyanobacteria and eutrophication in inland and near-coastal waters, *Remote sensing of environment* 156: 374-382.

- Odermatt, D., Gitelson, A., Brando, V. E., Schaepman, M. 2012: Review of constituent retrieval in optically deep and complex waters from satellite imagery, *Remote sensing of environment*, Vol. 118: 116-126.
- O'Neil, J. M., Davis, T. W., Burford, M. A., Gobler, C. J. 2012: The rise of harmful cyanobacteria blooms: The potential roles of eutrophication and climate change, *Harmful algae* 14: 313-334.
- Philipson, P., Kratzer, S., Mustapha, S.B., Strömbeck, N., Stelzer, K. 2016: Satellite-based water quality monitoring in Lake Vänern, Sweden, *International journal of remote sensing*, Vol. 37, No. 16: 3938-3960.
- Randolph, K., Wilson, J., Tedesco, L., Li, L., Pascual, D.L., Soyeux, E. 2008: Hyperspectral remote sensing of cyanobacteria in turbid productive water using optically active pigments, chlorophyll α and phycocyanin, *Remote sensing of environment* 112: 4009-4019.
- Richardson, L.L. 1996: Remote sensing of algal bloom dynamics, *BioScience*, Vol. 46, No. 7: 492-501.
- SLU 2020: Fokus på Mälaren, Miljödata – Urval ”33 stationer som provtas i augusti”, MVM, SLU, <https://miljodata.slu.se/mvm/Query?sites=335,336,337,338,339,340,341,342,343,344,347,875,36322,44349,44350,44351,44352,44353,44354,44355,44356,44357,44358,44359,44360,44361,44362,44363,44364,44365,44366,44367,44368&products=0,3,4,6,8,17> Besökt 2020-03-23
- SMHI 2020: Algsituationen, Sveriges meteorologiska och hydrologiska institut, SMHI, <https://www.smhi.se/vadret/hav-och-kust/algsituationen> Besökt 2020-04-20.
- Snoeijs-Leijonmalm, P., Schubert, H. & Radziejewska, T. (red.) 2017: *Biological Oceanography of the Baltic Sea*. Springer Netherlands, Dordrecht.
- Sommer, U., Adrian, R., De Senerpont Domis, L., Elser, J. J., Gaedke, U., Ibelings, B., Jeppesen, E., Lüring, M., Molinero, J. C., Mooij, W. M., Van Donk, E., Winder, M. 2012: Beyond the plankton ecology group (PEG) model: Mechanisms driving plankton succession, *Annual review of ecology, evolution, and systematics* 43: 429-448
- Sonesten, L. (red.) 2013: Mälaren – Tillståndsutvecklingen 1965-2011, SLU: Institutionen för vatten och miljö, Rapport 2013:1.
- Tikkanen, T. & Willén, T. 1992: *Växtplanktonflora*. Naturvårdsverket, Tuna-Tryck AB, Eskilstuna.
- Wetzel, R. G. 2001: *Limnology: Lake and river ecosystems* (3rd edition). San Diego, Academic Press, E-book.
- Widén, M. & Widén, B. (red.) 2008: *Botanik: systematik, evolution, mångfald*, Studentlitteratur, Lund.

- Willén, E. 2001: Phytoplankton and water quality characterization: Experiences from the Swedish large lakes Mälaren, Hjälmaren, Vättern and Vänern, *Ambio*, Vol. 30, No. 8: 529-537.
- Willén, E. 2007: Växtplankton i sjöar, bedömningsgrunder, SLU: Institutionen för miljöanalys, Rapport 2007:6, 37 pp.

Bilaga 1

Aktuell fördelning av provtagningar i Mälaren.

Provtagningsstation	Ordinarie provtagning augusti	Utökad provtagning vattenkemi	Utökad provtagning växtplankton
Blacken	✓	✓	
Ekoln Vreta Udd	✓	✓	✓
Galten	✓	✓	✓
Gorran	✓		
Granfj. Djurgårds Udde	✓	✓	✓
Görväln S	✓	✓	✓
Långtarmen	✓		
Lårstaviken	✓		
Marielunds fjärden	✓		
Mälaren, Arnöfjärden	✓		
Mälaren, Brobyviken	✓		
Mälaren, Freden	✓		
Mälaren, Garnsviken	✓		
Mälaren, Gripsholmsviken	✓		
Mälaren, Hilleshögviken	✓		
Mälaren, Köpingsviken	✓		
Mälaren, Rödstensfjärden	✓		
Mälaren, Årstaviken	✓		
Mälaren-Ulvsundasjön	✓		
Oxfjärden	✓		
Prästfjärden	✓	✓	
S. Björkfjärden SO	✓	✓	✓
Skarven	✓	✓	
Skofjärden	✓		
Stockholm D	✓		
Stora Ullfjärden	✓		
Strängnäs fjärden	✓		
Svinnegarnsviken	✓	✓	
Sörfjärden	✓		
Ulvhällsfjärden	✓	✓	
Väsbyviken	✓		
Västeråsfjärden N	✓	✓	
Västeråsfjärden S	✓		